

# 棒材同士の衝突を考慮したテンセグリティダイナミクスの導出

60200125 山崎達彦

発表日 2019 年 7 月 18 日

## 1 テンセグリティ構造について

### 1.1 テンセグリティ構造を用いることによるメリット，デメリットは何か

テンセグリティ構造とは、圧縮力のみを受け持つ圧縮材（棒）と引っ張り力のみを受け持つ張力材（ケーブル材）により構成され、各部材に対して適当なプリストレスを与えることにより、自己平衡状態を生み出す構造体である。このようなテンセグリティ構造の特徴として、部材の結合部にピンやボールジョイントを用いることにより、部材にはたらく力を軸方向の力（軸力）のみに制限することができる点がある。それによって曲げによる材料破壊を考慮しなくてよくなるため、部材を細くすることができ、構造体全体を軽量に設計することが可能となる。また、部材どうしの結合部（ノード）にモータを取り付けることによって、ケーブル材を巻き取り、形状の制御が可能である。そのため、構造に展開性を持たせることができるといった利点がある。

### 1.2 テンセグリティ構造の応用先はどこか

テンセグリティ構造は軽量で展開性を持つという特徴がある。そのため、宇宙構造物や大型構造物への利用が期待されている。人工衛星は、テレビ、自動車のナビゲーションシステム、スマートフォンなどの通信システムに幅広く応用されており、今後もその需要はさらに増大していくものと予想される。それに伴い、回収が困難、もしくは、不可能である、人工衛星の打ち上げ回数も増えていくと予想される。その場合、重量や体積がコストに大きく影響するため、積載物は、可能な限り小型で軽量に設計するのが望ましいと考えられる。そこで、上記のような大型構造物を軽量に設計する手法のひとつとして、軽量であることや展開性を有するテンセグリティ構造の応用が期待されている。また、スライドの図に示したテンセグリティロボットは、軽量かつ着地時の衝撃にも耐えうるロボットとして惑星探査への利用が期待せられ研究されている [1]。

### 1.3 テンセグリティ構造はどういったところが難しいのか

テンセグリティ構造体の部材要素である、梁やケーブルなどの動力学モデルは材料力学や構造力学などの分野で研究がなされているが、テンセグリティ構造物のような多数の部材が複雑に結合するシステムに対し、そのモデルを直接適応することは、モデル化の労力や計算量の観点から好ましくない。そのため、テンセグリティ構造物の解析には、対象の特性に応じた適当な近似を用い必要なモデルを導出するのが一般的であり、これまでも様々なモデルが提案され、その適用状況の拡大が進められている。

### 1.4 ケーブルごとに剛性を変えることは可能か

構造の中で部材ごとに剛性を変えることは可能である。しかし、今回のシミュレーションでは簡単化のためにケーブル材はすべて同じ剛性として計算を行う。

## 1.5 どれぐらい軽量，体積が小さくなるのか

テンセグリティ構造には，剛性を高める，軽量に設計するなどの目的に応じて様々な構造が形が設計されています．それをこれらの構造によって棒材とケーブル材をそれぞれ用いている数が異なるため，軽量になる量や小さくなる体積は一概には言えない．

## 1.6 安全性や健全性の意味はなにか

安全性とは，構造を安全に使用することができる能力である．健全性とは，部材や構造全体の許容応力などを考えて構造を壊すことなく使用することができる能力のことである．

## 1.7 折り畳みの方法はなにか

テンセグリティ構造には，ケーブル長を制御することによって行われる．ケーブル長の調節方法としては，ノードにモータなどを配置してケーブルを巻き取ることによって形状を制御する．クラスター化されたケーブルはこの中の特殊な手法である．

## 1.8 近似がどのレベルまで必要という基準はあるのか

本研究では，より現実の則した動力学モデルの導出を行うために，棒材同士の衝突を考慮することを考えました．近似のレベルがどこまで必要かは検討が必要です．現在までの，棒材の衝突が考慮されていない段階は現実には則していないため，考慮することは必要だと考えています．

# 2 部材の衝突について

## 2.1 棒材同士の衝突以外は考えないのか

テンセグリティ構造を折りたたむ場合には，形状によっても異なるが，棒材とケーブル材，ケーブル材同士の衝突も起きることが想定される．棒材同士の衝突は最も剛性が高い部材同士の衝突であり，影響が大きいと考えられる．そのため，本研究ではまず，その棒材同士の衝突に取り組みことにした．

## 2.2 棒材同士の衝突を考えることによるデメリットはあるのか

棒材同士の衝突はテンセグリティ構造を運用する際に十分起こりうる事象であり，より現実の則したモデルである．現在はまだ検証を行っていないが，衝突を考慮しないモデルよりは計算に時間がかかってしまうことが予想される．衝突を考える場合の従来研究では，相対侵入深さと相対速度から接触力を定義する手法で棒材同士の接触が考慮されていた [2]．この手法はモデル化が容易であり，理論の構築が容易であるという利点がある．しかしながら，大規模な構造で棒材を多く含む構造のシミュレーションを行う場合には，想定した速度の誤りが複数の部材で発生し，それが繰り返して生じることで，計算が進まなくなってしまう場合がある．その従来研究の手法よりは，本研究の提案手法はシミュレーション時間が短くなることが予想される．

## 2.3 動的な解析をしているが，実際に運用するとき動的に折りたたむのか

折りたたむ際にはそれほど動的な動きをしないかもしれないが，実際に運用する際にひとつの式ですべての場合を表したいと思い，衝突について動的な解析を行っている．

## 2.4 いかにコンパクトに折りたたんで体積を小さくするかということにはつなげられないのか

今回は、棒材の衝突を考慮した場合のテンセグリティダイナミクスの導出を研究目的としました。その解析を用いて効率の良い折り畳み方法を見つける研究に発展させることができる可能性もあるため、今後の課題である。

## 3 実験について

### 3.1 実験をする際のモデルはどのようにしますか

現在は従来用いられているモデルに従って理論構築を行っている段階である。今後は必要ですが、現在は実験には至っていません。今後実際に実験を行う場合には、理論で用いたものと矛盾しないような特性の材料を用いて行う必要がある。

### 3.2 実験を行う場合には、どのようにして棒材の距離を測るのか

ノードにセンサを配置することが可能であると考えられるため、その情報を用いる。

### 3.3 剛体と近似したシミュレーションと弾性部材の実機では差が生まれないのか

剛体と近似しうるほど剛性の高い部材を用いて実機を作成する。

## 4 提案手法について

### 4.1 提案手法の工夫点は何か

衝突を考える場合の従来研究では、相対侵入深さと相対速度から接触力を定義する手法で棒材同士の接触が考慮されていた。この手法は、大規模な構造で棒材を多く含む構造のシミュレーションを行う場合には、想定した速度の誤りが複数の部材で発生し、それが繰り返して生じることで、計算が進まなくなってしまう場合がある。その計算の繰り返しを回避するために接触力を線形相補性問題で決定する手法を提案した。現在までに、線形相補性問題を用いた接触力決定法の導出と棒材同士の距離の計算方法の導出を行った。

### 4.2 解析の精度はどの程度必要か、また、それを評価する方法はあるか

解析結果の妥当性は従来研究がある場合はその結果と合致するかで判断する。しかし、精度については決めていなかったため、検討が必要である。精度については、シミュレーションの値を比較することによって評価することが可能である。

### 4.3 線形相補性問題を用いたその他の従来研究はあるのか

線形相補性問題は、等式条件と相補性条件を満たすベクトルの組を求める問題である。テンセグリティに関しては、ケーブル材のスラックが、棒材の衝突と同じように計算の繰り返しが発生してしまう可能性がある。そのため、その計算の繰り返しを回避するために線形相補性問題を用いてケーブルスラックの計算のやり直しを回避する従来研究がある。

## 参考文献

- [1] Vytas SunSpiral, Adrian Agogino, and David Atkinson. Super ball bot-structures for planetary landing and exploration, niac phase 2 final report. 2015.
- [2] Ziyun Kan, Haijun Peng, Biaoshong Chen, Xiaohui Xie, and Lining Sun. Investigation of strut collision in tensegrity statics and dynamics. *International Journal of Solids and Structures*, 2019.